



[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開 2001-272381

(P 2001-272381A)

(43) 公開日 平成13年10月5日 (2001. 10. 5)

| (51) Int. Cl. <sup>7</sup> | 識別記号  | F I                 | テーマコード* (参考) |
|----------------------------|-------|---------------------|--------------|
| G 0 1 N 29/00              | 5 0 1 | G 0 1 N 29/00 5 0 1 | 2G047        |
| H 0 1 S 3/00               |       | H 0 1 S 3/00        | F 5F072      |

審査請求 未請求 請求項の数 6

O L

(全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2000-88252 (P2000-88252)

(22) 出願日 平成12年3月28日 (2000. 3. 28)

(71) 出願人 391012394

東北大学長

宮城県仙台市青葉区片平2丁目1番1号

(71) 出願人 000003193

凸版印刷株式会社

東京都台東区台東1丁目5番1号

(72) 発明者 山中 一司

宮城県仙台市泉区桂2-6-3

(72) 発明者 塚原 祐輔

東京都台東区台東1丁目5番1号 凸版印刷  
株式会社内

(74) 代理人 100058479

弁理士 鈴江 武彦 (外5名)

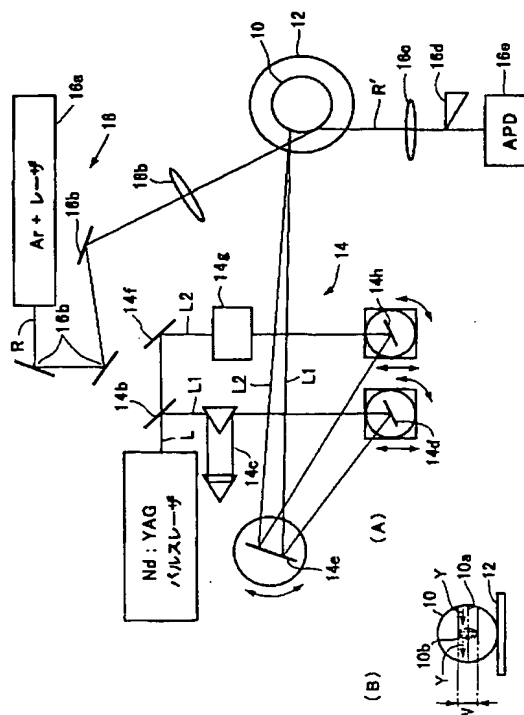
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 球面上の弾性波の発生法

(57) 【要約】

【課題】 基材の少なくとも球面の一部で形成されていて円環状に連続している外表面に、外表面の連続する方向に向かう弾性波を非接触で発生させることが出来る、球面上の弾性波の発生法を提供することである。

【解決手段】 少なくとも球面の一部で形成されていて円環状に連続している外表面を有した基材 10 の上記外表面において、上記外表面の連続する方向と上記外表面に沿い交差する方向の所定の範囲に弾性波を発生させるよう波動を照射し、この結果として上記基材の外表面の連続する方向に向かう弾性波を発生させる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 少なくとも球面の一部で形成されていて円環状に連続している外表面を有した基材の上記外表面において、上記外表面の連続する方向と上記外表面に沿って交差する方向の所定の範囲に波動を照射し、この結果として上記基材の外表面の連続する方向に向かう弾性波を発生させる、ことを特徴とする球面上の弾性波の発生法。

【請求項 2】 上記波動がレーザー光であり、上記所定の範囲に熱弾性効果を伴った干渉縞を発生させる、ことを特徴とする請求項 1 に記載の球面上の弾性波の発生法。

【請求項 3】 上記レーザー光が位相速度走査法により上記外表面の上記所定の範囲に照射される、ことを特徴とする請求項 2 に記載の球面上の弾性波の発生法。

【請求項 4】 上記弾性表面波の波長は上記球面の半径の  $1/10$  以下である、ことを特徴とする請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか 1 項に記載の球面上の弾性波の発生法。

【請求項 5】 上記外表面に沿って上記連続する方向と交差する方向における上記弾性表面波の幅が上記球面の直径の半分以下で上記半径の  $1/100$  以上である、ことを特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の球面上の弾性波の発生法。

【請求項 6】 上記所定の範囲は、上記所定の範囲において発生した上記弾性表面波が上記外表面に沿って上記連続する方向と交差する方向に拡散せずに上記連続する方向にのみ向かい、上記連続する方向に沿って上記外表面を一周するよう選択される、ことを特徴とする請求項 1 乃至請求項 5 のいずれか 1 項に記載の球面上の弾性波の発生法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、少なくとも球面の一部で形成されていて円環状に連続している外表面を有した基材の上記外表面において上記外表面の連続する方向に向かう弾性波を発生させる、球面上の弾性波の発生法に関係している。

## 【0002】

【従来の技術】構造物の基材の信頼性を確保する為に、基材の表面と表面直下の欠陥を迅速かつ高感度で非破壊検査をすることが強く望まれている。このような非破壊検査の為に弾性表面波を利用することが効果的であることが分かっている。

## 【0003】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら弾性表面波は発生源から遠ざかるにつれて拡散し伝搬効率が落ちる。しかも基材が少なくとも球面の一部で形成されていて円環状に連続している外表面を有している場合、上記拡散の度合いが大きく伝搬効率が非常に悪い。

【0004】この発明は、上記事情の下でなされ、基材の少なくとも球面の一部で形成されていて円環状に連続している外表面に上記基材の外表面の連続する方向に向かう弾性波を非接触で発生させる、球面上の弾性波の発生法を提供することである。

## 【0005】

【課題を解決するための手段】上述したこの発明の目的を達成する為に、この発明に従った球面上の弾性波の発生法は：少なくとも球面の一部で形成されていて円環状に連続している外表面を有した基材の上記外表面において、上記外表面の連続する方向と上記外表面に沿って交差する方向の所定の範囲に波動を照射し、この結果として上記基材の外表面の連続する方向に向かう弾性波を発生させる、ことを特徴としている。

【0006】このように構成されたことを特徴とする、この発明に従った球面上の弾性波の発生法においては、上記波動がレーザー光であり、上記所定の範囲に熱弾性効果を伴った干渉縞を発生させる、ことが好ましい。

【0007】レーザー光による波動の照射は制御が容易である。

【0008】上記基材の外表面の連続する方向に向かう弾性波を効率良く発生させるには、上記弾性波の波長は上記球面の半径の  $1/10$  以下であり、また上記外表面に沿って上記連続する方向と交差する方向における上記弾性波の幅が上記球面の直径の半分以下で上記半径の  $1/100$  以上である、ことが好ましい。

【0009】上記所定の範囲は、上記所定の範囲において発生した上記弾性波が上記外表面に沿って上記連続する方向と交差する方向に拡散せずに上記連続する方向にのみ向かい上記連続する方向に沿って上記外表面を一周するよう選択される。

【0010】そして実際には、波長パラメータ（上記球面上の連続する方向における周囲長さ／弾性波波長）が  $100$  乃至  $800$  である。

## 【0011】

【発明の実施の形態】以下この発明の第 1 の実施の形態に従った、球面上の弾性波の発生法について添付の図面中の図 1 を参照しながら詳細に説明する。

【0012】なお図 1 の (A) は、この発明の第 1 の実施の形態に従った、球面上の弾性波の発生法に使用される装置の全体を概略的に示す平面図であり；図 1 の

(B) は、図 1 の (A) の装置により弾性表面波が発生される球形状の基材の拡大された側面図である。

【0013】球形状の基材 10 は支持体 12 上に載置されている。基材 10 の外周面において支持体 12 との接点を通過しない最大円周線 10a と外周面に沿って直交する方向の所定の範囲 W には弾性表面波を発生させるよう波動照射手段 14 から波動が照射される。

【0014】所定の範囲 W は最大円周線 10a に沿って球形状の基材 10 の外周面（外表面）の一部で規定されて

いる円環状に連続している円環領域 10b を規定している。

【0015】波動照射手段 14 は、YAG パルスレーザー光源 14a から出射されたレーザービーム L をスプリッター 14b により 2 つに分割し、分割された一方のレーザービーム L1 を遅延素子 14c を介して第 1 の副回動反射鏡 14d に導き、第 1 の副回動反射鏡 14d からさらに主回動反射鏡 14e に導き、主回動反射鏡 14e から支持体 12 上の基材 10 の外周面の所定の範囲 W に照射している。分割された他方のレーザービーム L2 は反射鏡 14f 及びブラグセル (Bragg cell) 14g を介して第 2 の副回動反射鏡 14h に導かれ、第 2 の副回動反射鏡 14h からさらに主回動反射鏡 14e に導かれ、主回動反射鏡 14e から支持体 12 上の基材 10 の外周面の所定の範囲 W に照射されている。

【0016】2 つのレーザービーム L1, L2 は、所定の範囲 W において熱弾性効果を伴う干渉縞を発生させるよう第 1 の副回動反射鏡 14d, 第 2 の副回動反射鏡 14h, そして主回動反射鏡 14e により位置決めされる。

【0017】上述した如く所定の範囲 W において発生された熱弾性効果を伴う干渉縞は、所定の範囲 W において弾性表面波を発生する。所定の範囲 W が特定の条件に従い設定されている時、上記弾性表面波は球形状の基材 10 の外周面 (外表面) の円環領域 10b に沿い円環領域 10b の連続する方向と交差する方向に拡散せずに上記連続する方向 (最大円周線 10a に沿った矢印 Y で示す方向) にのみ向かい上記連続する方向に沿い上記外表面を少なくとも一周する。なお上記特定の条件については後で述べる。

【0018】図 1 の (A) の装置はさらに、球形状の基材 10 の外周面 (外表面) の円環領域 10b 中に発生し円環領域 10b 中を上述した如く伝搬する弾性表面波を非接触で検出する為の弾性表面波非接触検出手段 16 を備えている。弾性表面波非接触検出手段 16 は、Ar レーザー光源 16a と、Ar レーザー光源 16a から出射されたレーザービーム R を球形状の基材 10 の外周面 (外表面) の円環領域 10b 中で 2 つのレーザービーム L1, L2 が照射される位置から離れた位置へと導く種々の光学部材 16b と、上記離れた位置で反射されたレーザービーム R' を Ar レーザー光検出器 (APD) 16e に導く光学部材 16c 及びナイフエッジ 16d を備えている。

【0019】上記弾性表面波を球形状の基材 10 の外周面 (外表面) の円環領域 10b に沿い円環領域 10b の\*

$$PQ^2 = 2r^2 [1 - \cos \phi_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot \cos \phi_1 \cdot \cos \theta_1 - \sin \phi_0 \cdot \cos \phi_1 \cdot \cos \theta_1 - \cos \phi_0 \cdot \sin \phi_1 \cdot \sin \theta_1] \cdots (1)$$

である。従って、角 POQ =  $\theta$  とおくと余弦定理より

$$\cos \theta = \cos \phi_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot \cos \phi_1 \cdot \cos \theta_1 + \sin \phi_0 \cdot \cos \phi_1 \cdot \cos \theta_1 + \cos \phi_0 \cdot \sin \phi_1 \cdot \sin \theta_1 \cdots (2)$$

\* 連続する方向と交差する方向に拡散せずに、上記連続する方向 (最大円周線 10a に沿った矢印 Y で示す方向) にのみ向かい上記連続する方向に沿い上記外表面を少なくとも一周するよう伝搬させる上記特定の条件は、本願の発明者等が球面において所定の範囲の円弧内で上記円弧と直交する方向に弾性表面波を発生させることにより、弾性表面波が上記円弧の方向に拡散することなく上記円弧と直交する方向に上記球面を周回することを発見したことによりなされた。

10 【0020】なお上記所定の範囲よりも小さな弾性表面波の発生源では、話しを簡単にする為弾性表面波の発生源を点とすると、弾性表面波は発生源を中心にして球形状の基材の外表面上を同心円状に広がった後に、球形状の基材の外表面において上記発生源とは正反対の側の地点に向かい同心円状に集束し、また上記正反対の側の地点から球形状の基材の外表面上を同心円状に広がった後に、球形状の基材の外表面において上記正反対の側の地点とは正反対に位置する弾性表面波の発生源に再度集束する。即ち、弾性表面波の発生源から放射された弾性表面波は上記外表面においてその進行方向と直交する方向に拡散してしまう。

20 【0021】幅の広い弾性表面波の発生源では、発生源から発生された弾性表面波は上記所定の範囲の中心を通過し、上記所定の範囲の円弧と直交する方向に沿い伝搬するとともに、上記円弧を含む円周線を赤道と仮に考えた時の極に該当する位置に向かい集束し、極に該当する位置を通過した後は上記円周線上において上記所定の範囲とは正反対の側で上記所定の範囲と同じ所定の範囲に拡散し、さらに別の極に該当する位置に向かい集束し、別の極に該当する位置を通過した後は上記所定の範囲に再度拡散するという、球の半周毎の集束と拡散とを繰り返す。

【0022】そして、弾性表面波が上記円弧の方向に拡散することなく上記円弧と直交する方向に上記球面を周回する為の特定の条件は以下のようにして求められた。

【0023】図 2 には、本発明の効果を示す計算のための座標系が示されている。xyz 座標軸と半径 r の球面の交点を A, B, C として、円弧 AC に対し平行な円弧 DF 上の点 P から発生した弾性表面波が円弧 CG 上の点 Q に達するとする。角度  $\phi_0, \theta_0, \phi_1, \theta_1$  を図 2 中に示したように取ると、点 P, Q の座標は  $(r \cos \phi_0 \cdot \cos \theta_0, r \sin \phi_0 \cdot \cos \theta_0, r \cos \phi_0 \cdot \sin \theta_0)$  及び  $(r \cos \phi_1 \cdot \cos \theta_1, r \cos \phi_1 \cdot \sin \theta_1, r \sin \phi_1 \cdot \sin \theta_1)$  となるため、

の関係が成り立つ。点Pで発生した弾性表面波の点Qにおける粒子変位の半径方向成分は、

【0024】

【数1】

$$u_r = R_e \left[ \frac{C}{\sqrt{\sin \theta}} \exp \left\{ i m \left( \theta - \frac{C_R t}{r} \right) \right\} \right]$$

… (3)

【0025】と表わすことが出来る (Viktorov, Rayleigh and Lamb Waves P 42)。なおここで、Cは定数、mは円周の長さとの比で、波数パラメータと呼ぶ。またC<sub>R</sub>はレイリー波速度、tは時間である。角度θは式(2)から求められる。点Eから見込む角度が2θ<sub>A</sub>の円弧状音源による点Qの音場は、式(3)を式(2)に含まれる角度θ<sub>1</sub>を独立変数にとり、-θ<sub>A</sub>からθ<sub>A</sub>まで積分することにより得られる。音場分布は点Qの迎角θ<sub>1</sub>を変化させて計算することで求められる。

【0026】図3の(A)、(B)、(C)、そして(D)には、点PがXZ面上にあるφ<sub>1</sub>=0の場合について、上記の式(2)及び(3)を使用して求めた弾性表面波が球形状の基材12上を伝搬する4つの状態が示されている。

【0027】図3の(A)、(B)、そして(C)は、波数パラメータm=600の場合の音場(粒子変位の大きさの角度θ<sub>1</sub>依存性)を調べた結果である。図の各々において、最も下のプロットは球面上の弾性表面波の伝搬を表す角度(伝搬角)φ<sub>1</sub>が10°の場合の音場であり、上に向かって20°ずつ増加した場合の音場が順にプロットしてある。

【0028】図3の(A)は、開口半角θ<sub>A</sub>=30°の場合である。この場合には、弾性表面波の伝搬状態は集束ビーム形状である。即ち、伝搬角φ<sub>1</sub>が増加するにつれて音場の幅が減少し、φ<sub>1</sub>=90°で最小になった後は再び幅が増加し、対極点180°で音源上と同じ分布が再現される。以降は180°毎に上記同じ変化が繰り返えされ、何周回しても同じ変化が繰り返えされる。こ\*

波数パラメータm  
(球の周囲長/弾性表面波波長)

150  
300  
450  
600  
750

なおこれは、数値計算による近似値である。

【0034】以上詳述したことから明かなように、この実施の形態では、波数パラメータmから上記の式(3)を使用してコリメート角θ<sub>co1</sub>を求めるようにしてい

\*の場合、開口半角θ<sub>A</sub>=30°よりも音場が広がることなく、θ<sub>1</sub><θ<sub>A</sub>の帯状部分に弾性表面波のエネルギーが閉じ込められている。この場合には、球形状の基材12の外表面においてθ<sub>1</sub>>θ<sub>A</sub>の部分に他の物体を接触させても音場に擾乱は生じない。

【0029】図3の(C)は、開口半角θ<sub>A</sub>=1°の場合である。この場合には、弾性表面波の伝搬状態は点音源の場合と類似した発散ビーム形状である。即ち、伝搬角φ<sub>1</sub>が増加するにつれて音場の幅も増加し、φ<sub>1</sub>=90°で最大になった後は再び幅が減少し、対極点180°で音源上と同じ分布が再現される。この場合は、図3の(A)を参照しながら上述した集束ビームの場合とは異なり、θ<sub>1</sub><θ<sub>A</sub>の帯状部分に弾性表面波のエネルギーが閉じ込められることが無く、φ<sub>1</sub>=90°ではθ<sub>1</sub>=50°程度にまで広がってしまう。この場合には、球形状の基材12の外表面においてφ<sub>1</sub>=90°において球形状の基材12の外表面のθ<sub>1</sub>>θ<sub>A</sub>の部分に他の物体を接触させると音場に擾乱が生じる。

【0030】図3の(B)は、開口半角θ<sub>A</sub>=3.5°の場合である。この場合には、弾性表面波の伝搬状態は伝搬角φ<sub>1</sub>が増加しても音場の幅は殆ど変化しないコリメートビーム形状である。即ち、θ<sub>1</sub><θ<sub>A</sub>の帯状部分に弾性表面波のエネルギーが閉じ込められている。このようなコリメートビームが得られる開口半角θ<sub>A</sub>をコリメート角θ<sub>co1</sub>と呼ぶ。

【0031】図3の(A)乃至(C)から明かなように、開口半角θ<sub>A</sub>がコリメート角θ<sub>co1</sub>に略等しい時、最も幅の狭い帯状部分に弾性表面波のエネルギーが閉じ込められているさらに、波数パラメータを変化させて上述したのと同様の数値解析を行った結果、波数パラメータmによりコリメート角θ<sub>co1</sub>が変化することが分かった。図3の(D)は、波数パラメータmが300の場合に弾性表面波の伝搬状態がコリメートビーム形状になるのは、開口半角θ<sub>A</sub>が略4.5°であることを示しており、この場合のコリメート角θ<sub>co1</sub>は略4.5°になる。

【0032】以下には、波数パラメータmが変化した場合のコリメート角θ<sub>co1</sub>の値を示す。

【0033】

コリメート角θ<sub>co1</sub>

7.0  
4.5  
4.0  
3.5  
3.0

る。そして、球形状の基材10の外表面上の所定の幅Wの円環領域10b中の所望の位置に、波動照射手段14から波動(即ち、レーザー光L1、L2)がコリメート角θ<sub>co1</sub>により規定される幅より広く照射され弾性表面

波を発生させると、この弾性表面波は球形状の基材 10 の外表面上で、所定の幅 W の範囲内を上記コリメート角  $\theta_{\text{col}}$  の方向に拡散することなく伝搬する。図 1 では、上記コリメート角  $\theta_{\text{col}}$  と直交する方向が最大円周線 10a に沿った方向に相当している。

【0035】さらに、本願の発明に従った球面上における弾性表面波発生方法を図 1 の (A) の装置を使用して実行した本願の発明の発明者達の実験について詳細に説明する。

【0036】弾性表面波 (SAW) の位相速度で走査された干渉縞の弾性効果を使用して、直径 8 mm の鋼製軸受球上に中心周波数 30 MHz の SAW の波束を生じさせた。この結果、驚くべき多くの回数 (20 回) の SAW の周回伝搬を観測出来た。1 回目の周回と 12 回目の周回における SAW の時間間隔は 93  $\mu$ s である。一方、2 波形の正確な重複が可能なので、上記時間間隔を 2 ns の分解能で決定することが出来た。従って、速度の測定においては 0.002 % の非常に高い分解能を達成することが出来た。そして 50 nm の厚さの銀の付着による 2 m/s の速度変化も容易に検出することが出来た。この方法は非接触なので、軸受球の非破壊検査の為に有用である。

【0037】機械の回転軸や軸受球のような湾曲した表面を伴った物体は、非破壊検査 (NDE) の重要な対象である。この目的の為に、弾性表面波 (SAW) を使用して表面または表面近傍の性質を評価する必要がある。レーザー超音波は非接触なので湾曲した表面には有用である。ローヤーその他 (D. Royer, E. Dieulesaint, X. Jia and Y. Shui) は応用物理レター 52 (Appl. Phys. Lett. 52) 1988. 706 において、球上にレーザーにより発生された SAW を記載している。ローヤーその他は、Q スイッチ YAG レーザーを約 0.5 mm の直径のスポットへと集光することにより球上に SAW を発生させている。SAW は、極 (I. A. Viktorov; Rayleigh and Lamb Waves (Plenum, New York, 1967) P. 33)、即ち発生点とは直径方向に反対側の地点で、最も大きな振幅 (約 3 nm) で検出される。しかし、周波数が低く帯域幅が広いので、球に特有な伝搬の間の波形変化と大きな分散効果が生じている (I. A. Viktorov; Rayleigh and Lamb Waves (Plenum, New York, 1967) P. 33)。

【0038】このような従来例に対し、本願の発明者等は SAW を選択的に励起出来る位相速度走査 (PVS) 法 (K. Yamanaoka, Y. Nagata, and T. Koda; Appl. Phys. Lett. 58, 1991, 1591) を開発した。PVS 法の走査干渉縞 (SIF) 方式 (H. Nishino, Y. Ts

ukahara, Y. Nagata, T. Koda and K. Yamanaoka; Appl. Phys. Lett. 32, 1993, 2036; K. Yamanaoka, O. Kolosov, H. Nishino, Y. Tsukahara, Y. Nagata, and T. Toda; J. Appl. Phys. 74, 1993, 6511) においては、縞の走査速度  $V_s$  が SAW の位相速度  $V_R$  と一致した時に高周波数 SAW (30 乃至 110 MHz) の波束が効果的に励起される。この場合は、周波数が高く帯域幅が狭いので、分散の効果が無視でき、伝搬の間に波形は変わらない。このことは、速度測定における高精度を容易に実現する為に有益である (K. Yamanaoka; J. Appl. Phys. 36, 1997, 2939)。

【0039】実験は、8 mm の直径の鋼製軸受球上で行われた。1 つの球が購入されたままで使用された。他の 2 つの球は、表面に真空蒸着により銀 (Ag) が蒸着された。表面の湾曲のために厚さは球上で均一ではないが、最大厚さは約 50 nm と 150 nm であった。

【0040】図 1 の (A) が、球形状の基材 10 (8 mm の直径の鋼製軸受球) 上に弾性表面波を発生させ、それを検出する為の装置を示している。3 mm の直径の 2 本の YAG レーザービーム L1, L2 が基材 10 の外表面の所定の範囲 W (図 1 の (B)) に対し略直角に向けられており、一方の YAG レーザービーム L1 に対し他方の YAG レーザービーム L2 はプラグセル 14g を使用して 30 MHz だけ周波数が偏移されている。異なった周波数を伴った 2 本のレーザービーム L1, L2 の干渉により、基材 10 の外表面の所定の範囲 W (図 1 の (B)) において 2 本のレーザービーム L1, L2 が照射された部分に走査干渉縞が形成される。第 1 の副回動反射鏡 14d, 第 2 の副回動反射鏡 14h, さらに主回動反射鏡 14e のような機械的な調整手段により、干渉縞の平均隙間が SAW の波長に等しくされるとともに、干渉縞の走査速度は位相速度に等しくされ、干渉縞と SAW との位相の整合が行われる。レーザービーム L1, L2 は、干渉縞と SAW との間の長い相互作用時間を達成する為に、100 ns 程度の特別に設計された長いパルスを持している。長い相互作用時間は、バルク超音波 (BAW) を抑制 (K. Yamanaoka; Jpn. Appl. Phys. 36, 1997, 2939) する一方で、PVS 法における SAW の選択的な発生と増幅の為に必須である。

【0041】SAW は干渉縞に対して直角な、基材 10 の最大直径線 10a (図 1 の (B)) に沿い、所定の範囲 W の円環領域 10b (図 1 の (B)) 中を繰り返し伝搬する。次に SAW は、干渉縞から 3~4 mm 離れた位置で集光された Ar レーザーを用いた光学的ナイフエッジ法による弾性表面波非接触検出手段 16 により 1 周毎に検出される。検出後には、20 MHz 以下の周波数成

分はフィルタにより除去される。このフィルタによる除去は、レーザービームの非干渉成分により発生するBAWを除去することに役立つ。パルス幅が長い(100ns)ので、BAWの周波数は10MHz以下であり、SAWの周波数からは完全に分離している。

【0042】図4は、図1の(A)の弾性表面波非接触検出手段16により検出された信号を示している。多数の波束が観察される。まず基材10の頂部にシリコン油を滴下することにより、この多数の波束はBAWでなくSAWであることを確かめた。シリコン油滴が小さく、基材10の外周面において最大直径線10a(図1の(B))に沿う所定の範囲Wの円環領域10b(図1の(B))中における、干渉縞と弾性表面波非接触検出手段16によりSAWが検出される地点との間に到達しない間は、上記信号は変わらない。しかし、シリコン油滴が円環領域10b(図1の(B))中における干渉縞と弾性表面波非接触検出手段16により弾性表面波が検出される地点との間に到達すると、上記信号は完全に消滅する。このことは、上記信号の全てがSAWでありBAWでないことを証明している。さらに、SAWは、上記の円環領域10b(図1の(B))中のみで基材10の外周面を周回し、円環領域10b(図1の(B))外には拡散しないことを証明している。SAWの周回数は約20回であり、これは約50cmの伝搬距離に相当する。なお、ゼロレベル近傍のノイズはブラグセル14gを駆動する為の30MHz信号の漏れであり、注意深い遮蔽により除去することが出来る。

【0043】図5の(A)は、実験に使用された基材10上で、1周目に図1の(A)の弾性表面波非接触検出手段16により検出された信号(上部)と、50nmの厚さの銀で被覆された球形状の基材上で1周目に検出された信号(中間)と、そして150nmの厚さの銀で被覆された球形状の基材上で1周目に検出された信号(下部)を示している。図5の(B)は、図5の(A)と同じ条件の球形状の基材上で12周目で検出された同様の信号を示している。信号対雑音比は非常に高い。図5の(A)及び(B)における信号の時間間隔は大きい(93μm)が、これらの形状はほとんど変わっていない。

【0044】パルスエコー重複法(pulse echo overlap method)、又は相互相関法を適用する時には、2つの信号の同一性が精密な時間間隔測定の為に重要である。そこでこの同一性を調べるために、12周目の信号を1周目の信号に向かい移動させることによりこれらの信号を重複させた。移動量が93.470μsの時、図6の(C)中に示されている如く、12周目の信号の位相は1周目の信号の位相よりわずかに遅れた。移動量が8nsだけ増加した時、図6の(A)中に示されている如く、12周目の信号の位相は1周目の信号の位相よりわずかに前進した。しかしながら、移動量を、2つの信号の相互相関関数におけるピー

クから決定される93.474μsとした時には、これらは図6の(B)中に示されている如く、ほぼ完全に重複する。この結果、4nsの変化が容易に検出可能な位相ずれを生じさせることが分かった。従って、2つの信号の位相遅延の決定の不確かさは4ns以下であり、約2ns程度である。全時間間隔は93μsであるので、この不確かさの相対的な大きさは0.002%であると見積もられる。

【0045】この極めて高い分解能を利用して、50nmと150nmの厚さの銀(Ag)フィルムの蒸着による小さな速度変化を検出することを試みた。図5を見るだけでも、銀フィルムの蒸着による1周目の信号(図5の(A))と12周目の信号(図5の(B))との間の時間間隔の差異が明瞭に認められる。定量測定の為に、1周目の信号と12周目の信号における相互相関関数を計算した。そして、実験に使用された基材10上の時間間隔は93.474μsであり、50nmの厚さの銀で被覆されている球形状の基材上での時間間隔は93.556μsであることを見出した。球形状の基材10の直径は8mmなので、夫々におけるSAW速度は2957.6m/sと2955.0m/sであり、2.6m/sの差である。3つの異なった測定において得られたSAW速度を図7中で銀被覆のフィルム厚さの関数として示した。この図からは、銀被覆のフィルム厚さの増加に伴うSAW速度の減少の明瞭な傾向が見られる。測定された速度の典型的なばらつきの大きさは10cm/s程度である。絶対値が2958m/sであると考ええると、相対的なばらつきは0.0034%と小さいことがわかる。

【0046】多数回周回によるSAWの長距離伝搬は、本願の発明者により最初に実現された独特な特徴である。その理由は以下のように要約することが出来る。

【0047】(1)全てのレーザー超音波法に共通であるが、励起と検出とが完全に非接触で行われる。従って、SAWは、超音波カプラーまたは変換器による減衰や分散を受けない。

【0048】(2)PVS法においては、SAWの振幅はレーザーパルス幅Tに比例している。従って、振幅は従来のレーザー超音波よりも大きい(K. Yamana ka, O. Kolosov, H. Nishino, Y. Tsukahara, Y. Nagata, and T. Toda; J. Appl. Phys. 74, 1993, 6511)。

【0049】(3)PVS法のもう1つの特徴としては、位相合致条件がSAWによりみたされた時(K. Yamana ka: Jpn. Appl. Phys. 36, 1997, 2939)、BAWが抑制されることである。従って、SAWはBAWにより妨害されない。

【0050】(4)周波数が30MHzであり速度が3000m/s近傍であるので、波数と球の半径(4m



m) との積  $ka$  は最大で  $80\pi$  である。 $ka$  のこの範囲では、分散効果が無視出来 (D. Royer, E. Dieulesaint, X. Jia and Y. Shui; Appl. Phys. Lett. 52, 1988, 706; I. A. Viktorov; Rayleigh and Lam Waves (Plenum, New York, 1967) P. 33)、そして波形が、図 6 中に示されている如く、SAW の伝搬に従い変化しない。

【0051】結論として、球形状の基材上における高周波弾性表面波の多数回周回伝搬に基づく新規な、球面上における弾性表面波発生方法を提供した。この方法は SAW 速度における小さな変化の精密測定の為に有用であり、表面傷、欠陥、そして残留応力により生じる非線形効果の精密測定にも有用である。鋼製やセラミック製の軸受球の高感度 NDE (非破壊評価) システムもこの方法を基礎にして構成することが出来る。

#### 【0052】

【発明の効果】以上詳述したことから明かなように、この発明に従った球面上の弾性波の発生法によれば、基材の少なくとも球面の一部で形成されていて円環状に連続している外表面に、上記基材の外表面の連続する方向に向かう弾性波を非接触で発生させることが出来る。

#### 【図面の簡単な説明】

【図 1】(A) は、この発明の第 1 の実施の形態に従った、球面上の弾性波の発生法に使用される装置の全体を概略的に示す平面図であり；そして、(B) は、(A) の装置により弾性表面波が発生される球形状の基材の拡大された側面図である。

【図 2】球形状の基材の外周面に弾性表面波を発生させ

伝搬させる為に必要な所定の幅を規定する為に使用する式の基礎となる座標系を概略的に示す斜視図である。

【図 3】(A)、(B)、(C)、そして (D) は、図 2 の座標系を使用して作成された式により計算された波数パラメータ  $m$  (円周の長さとの弾性表面波の波長の比) と開口半角 (振動手段を設ける幅の  $1/2$ ) を変えて得られた弾性表面波が球形状の基材の外周面上を伝搬する 4 つの状態を概略的に示す図である。

【図 4】図 1 の (A) の装置により球形状の基材の外周面の所定の領域に発生された SAW (弾性表面波) の信号を示している。

【図 5】(A) は、基材の表面条件を変化させた時の第 1 回目の周回の SAW の波形を示す図であり；そして、(B) は、基材の表面条件を変化させた時の第 12 回目の周回の SAW の波形を示す図である。

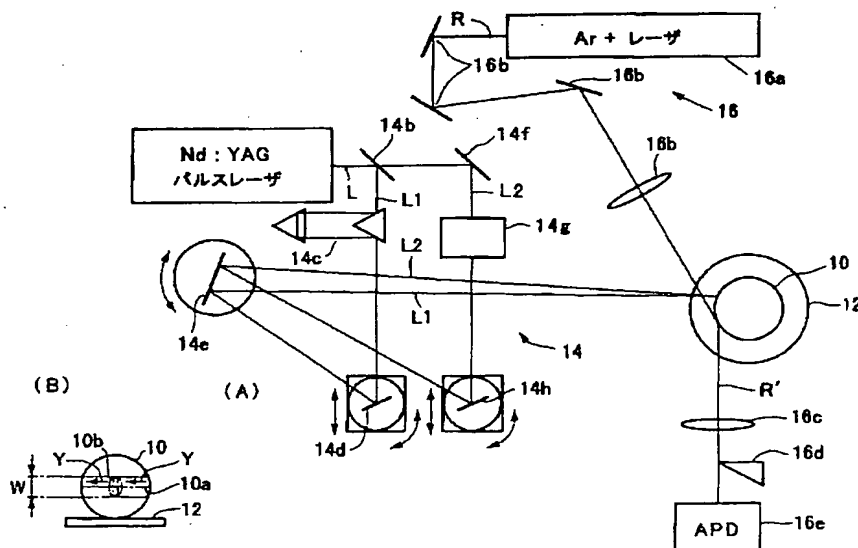
【図 6】(A)、(B)、そして (C) は、図 5 の (A) の 3 つの SAW の波形と図 5 の (B) の 3 つの SAW の波形とを重複させて示す図である。

【図 7】図 1 の (A) の装置により球形状の基材の外周面の所定の領域に発生される SAW 速度を、基材の外周面に被覆される銀フィルムの厚さの関数として示す図である。

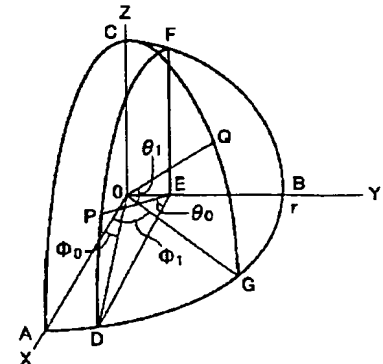
#### 【符号の説明】

- 10 基材
- 10a 最大円周線
- 10b 円環領域
- 12 支持体
- 14 波動照射手段
- 16 弾性表面波非接触検出手段

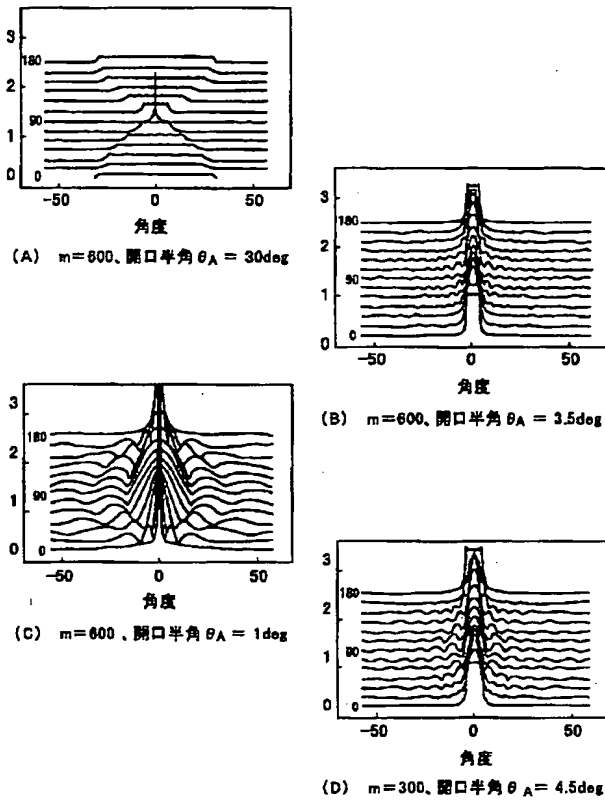
【図 1】



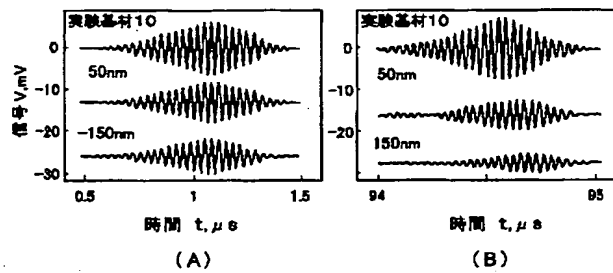
【図 2】



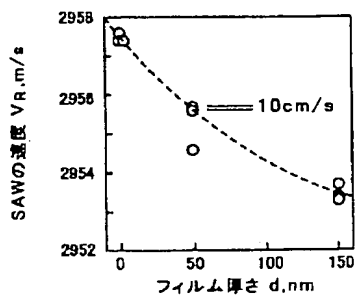
【図3】



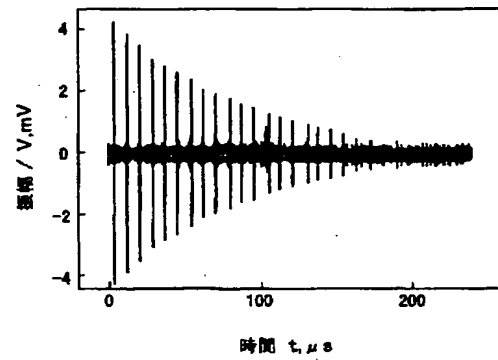
【図5】



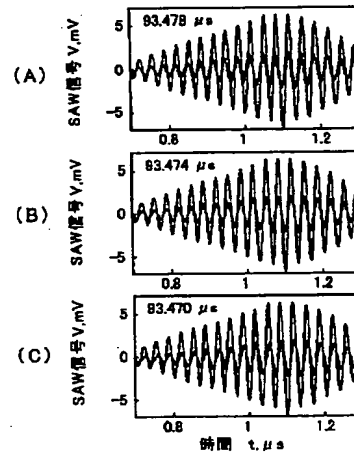
【図7】



【図4】



【図6】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2G047 AB00 AC08 BC07 CA04 GD01  
5F072 AA02 AB01 KK05 KK15 KK30  
YY20